

PLASMAS DE INTERES AEROESPACIAL

Por IGNACIO DA-RIVA

Dr. Ing. Aeronáutico del INTA

Conferencia pronunciada por su autor en el curso especial para graduados superiores sobre electrónica cuántica, física del sólido y del plasma, celebrado en el Instituto Nacional de Física.

El hombre está en el umbral de la era espacial, a punto de desvelar los misterios más intrigantes del universo. En esta aventura utiliza satélites y sondas espaciales con el fin de obtener información que le permita comprobar la validez de las teorías existentes, muchas de ellas contradictorias. Si las posibles aplicaciones prácticas de la investigación espacial se muestran ya como provechosas, el alcance científico de tal investigación está más allá de toda posible medida.

La exploración del espacio se está convirtiendo, cada vez más acusadamente, en el estudio de la interacción entre plasma y campo magnético. Esto se

debe a que el espacio está formado fundamentalmente por un plasma atravesado por campos magnéticos, y sus interacciones dan lugar a muchos fenómenos geofísicos de interés. Puede afirmarse sin exageración que, salvo en algunos lugares excepcionales como la corteza terrestre, la materia tiene una temperatura suficientemente alta como para estar ionizada. Cuando ocurre tal cosa, el comportamiento dinámico del medio puede ser dominado por las fuerzas electromagnéticas que actúan sobre los electrones e iones libres, y sus propiedades son suficientemente diferentes de las de los gases no ionizados, como para merecer un nuevo nombre, debido a LANGMUIR: PLASMA.

La diferencia más importante entre un plasma y un gas normal reside en la habilidad del primero para soportar una corriente eléctrica. El plasma es buen conductor de la electricidad, mientras que el gas normal es aislante. Las consecuencias dinámicas de tal particularidad son especialmente importantes si existe un campo magnético, en cuyo caso el movimiento del gas está fundamentalmente determinado por la fuerza másica electromagnética \vec{F} :

$$\vec{F} = \vec{j} \wedge \vec{B};$$

\vec{j} , es la corriente eléctrica que circula por el conductor;
 \vec{B} , el campo magnético.

Obsérvese que en esta ley se fundamenta el motor eléctrico.

La Magnetofluidomecánica estudia las relaciones entre fuerzas y desplazamientos cuando existe interacción entre un campo electromagnético y un fluido conductor en movimiento. Ejemplos de fluidos conductores pueden ser: el mercurio, metales fundidos, soluciones salinas, gases ionizados, etc.

El término Plasmasfísica es más restringido que el de Magnetofluidomecánica, ya que, por una parte, no implica la existencia de un campo magnético aplicado y, por otra, el fluido conductor es de un tipo muy particular.

El estudio de los gases ionizados tiene una respetable antigüedad y ha demostrado ser una rama muy fecunda de la física. De hecho, el estudio moderno de la física molecular, atómica y nuclear, debe su origen a las investigaciones sobre la conducción de electricidad a través de gases.

El estudio científico de la magnetofluidomecánica (denominación que apenas ha cumplido diez años de edad) es muy reciente. Los primeros experimentos de laboratorio, con mercurio, fueron realizados por HARTMANN en 1937.

Recientemente se ha renovado el interés por el estudio del plasma. La renovación fué iniciada por los astrónomos deseosos de conocer el comportamiento del gas ionizado en la superficie del sol, de las estrellas, en el espacio interplanetario e interestelar; y por los geofísicos interesados en el estudio de la dinámica ionosférica. Los progresos realizados en los últimos años se deben, fundamentalmente, a las posibles aplicaciones tecnológicas: confinamiento del plasma, conversión directa de energía y propulsión eléctrica de aeronaves espaciales.

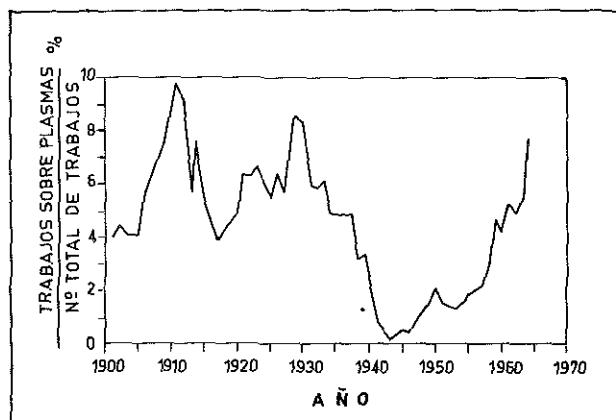


Fig. 1. (Ref. 1).—Fracción de trabajos en Physics Abstracts relacionados con el plasma. En tanto por ciento.

La figura 1 muestra el porcentaje de trabajos relacionados con el plasma, a los que se hace referencia en Physics Abstracts. Los primeros máximos que aparecen en el gráfico corresponden al estudio de problemas de descarga en gases (plasmas estáticos). De tal época datan muchos de los grandes avances en los que se basa la tecnología moderna.

El aumento experimentado al finalizar la segunda guerra mundial se debe al interés por el estudio de la dinámica de plasmas en movimiento. Este interés nació, como hemos dicho, de la investigación de los problemas de la magnetosfera y alta atmósfera, y de la consideración de las posibles aplicaciones prácticas.

1.2. ALGUNAS APLICACIONES PRÁCTICAS NO ESPACIALES.

Dado que el presente trabajo se centra fundamentalmente en las aplicaciones aeroespaciales de la física del plasma, pasaremos revista somera a algunas aplicaciones no espaciales (confinamiento y conversión directa de energía) dejando para más adelante las aplicaciones espaciales.

1.2.1. *Confinamiento del plasma.*—La liberación de inmensas cantidades de energía mediante la fusión nuclear, plantea el problema de que es necesario contener y conducir gases a temperaturas elevadas. Esto plantea problemas de pérdidas de calor por contacto con las paredes.

Es posible, teóricamente, evitar el contacto con las paredes mediante configuraciones en las que el plasma se mantiene apartado por medio de campos magnéticos. Sin embargo, los intentos realizados para conseguir el confinamiento magnético (pinch),

han tropezado con dificultades relacionadas con la inestabilidad del plasma y han conseguido solamente un éxito parcial.

1.2.2. *Conversión directa de la energía de un gas en electricidad.* — En las centrales térmicas existentes en la actualidad, la combustión convierte la energía química en térmica, ésta pasa a mecánica y, finalmente, a eléctrica. El rendimiento global de la transformación es bajo a consecuencia de los pasos intermedios. Es posible simplificar la conversión utilizando un gas ionizado en movimiento, cuya misión es análoga a la del arrollamiento del rotor del generador. El esquema está basado en el hecho de que un gas ionizado satisface una "ley local de Ohm":

$$\vec{j} = \sigma [\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}].$$

- \vec{j} , es la densidad de corriente en el gas;
 σ , la conductividad eléctrica;
 \vec{E} , campo eléctrico aplicado;
 $\vec{v} \wedge \vec{B}$, campo eléctrico inducido;
 \vec{v} , velocidad del medio conductor;
 \vec{B} , intensidad del campo magnético.

La aplicación de esta fórmula a la conversión directa de energía térmica en eléctrica, se basa en la utilización de un chorro de gas a elevada temperatura y velocidad. Con el fin de producir la ionización sin necesidad de recurrir a temperaturas más altas de las que permite el estado actual de la técnica metalúrgica, se disemina en el gas vapor de metal alcalino, cuyo potencial de ionización es bajo. El gas conductor parcialmente ionizado, se mueve a través de un campo magnético, y entre unos electrodos de los que es posible extraer corriente eléctrica. Los resultados obtenidos en diferentes países parecen alentadores.

Incidentalmente cabe decir que la relación entre corriente y voltaje mostrada anteriormente, sugiere aplicaciones muy variadas: si un fluido conductor se mueve con velocidad constante en un conducto de anchura L , a través de un campo magnético, aparecerá un voltaje v , $B \cdot L$; de esta forma, se mide la velocidad de circulación de la sangre u otras soluciones salinas mediante un campo magnético. Inversamente, la medición de la intensidad de un campo magnético se reduce a la de la fuerza electromotriz en un chorro de mercurio que atraviesa dicho campo con velocidad conocida (Magnetómetro de Kolin-Rhoderick).

2. Plasmas de interés aeroespacial.

De lo dicho hasta ahora se deduce que la relación entre la física del plasma y la ciencia aeroespacial es doble: el medio que se desea explorar está ocupado por el plasma, y el sistema propulsivo utilizado para llegar al lugar de la experiencia puede utilizar, durante ciertas fases, las propiedades características de los plasmas.

Sin embargo, los problemas en uno y otro campo son radicalmente distintos. Basta decir que la longitud característica de los primeros es de unos 10.000 Km. y la de los segundos de 1 cm.

Para distinguir unos problemas de otros y hacer un estudio razonablemente profundo, es necesario introducir algunas consideraciones teóricas.

2.1. LONGITUDES CARACTERÍSTICAS DEL PLASMA.

El plasma es un gas formado por electrones, iones y moléculas. Es conductor de la electricidad, pero globalmente neutro, es decir, en un volumen dado el número de iones es igual al de electrones.

Esta propiedad, probablemente la fundamental del plasma, se debe al elevado valor de la relación carga/masa del electrón. Cualquier pequeña separación de iones y electrones da lugar a un campo eléctrico capaz de acelerar fantásticamente los electrones, y en mucha menor proporción los iones (fig. 2).

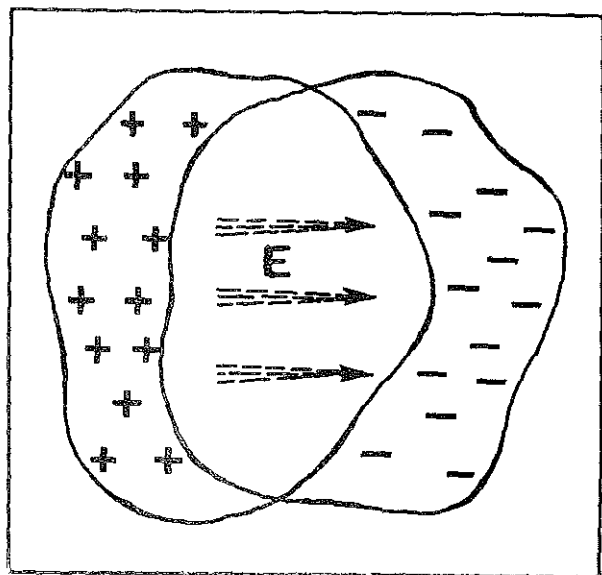


fig. 2. (Ref. 2). — Explicación de la neutralidad global del plasma. El campo eléctrico producido por la separación de las cargas, acelera los electrones en dirección de la posición ocupada por los iones.

Esta aceleración introduce los electrones en la zona cargada positivamente, restableciendo la neutralidad global del plasma.

Por ejemplo, un 1 por 100 de separación por metro cúbico de un plasma de densidad 10^{11} cm.⁻³, produce un campo de 150 V./cm., suficiente para acelerar los electrones a 10^{17} cm./seg.².

Se ocurre pensar que la forma lógica de estudiar el comportamiento de un plasma será la consistente en seguirlo partícula a partícula utilizando métodos estadísticos análogos a los de la Teoría Cinética de Gases.

Según esto será necesario plantear la ecuación de BOLTZMANN que relaciona el flujo de partículas provistas de una cierta velocidad a través de las fronteras de un cierto dominio parcial del espacio de las fases, con las causas que producen la acumulación en tal dominio (interacciones entre partículas). Si fuera posible plantear y resolver tal ecuación en todos los casos reales, con cualquier combinación de campos eléctricos y magnéticos, y cualquiera que fuera la configuración macroscópica del fenómeno, sería posible tener una visión conjunta de todo el campo de la magnetofluidomecánica.

El tratamiento "universal" no es posible y parece acertado estudiar casos extremos en los que ciertos efectos sean inapreciables o, hablando en lenguaje matemático, ciertos términos de la ecuación de BOLTZMANN sean despreciables.

La forma más clara de poner de manifiesto la importancia de estos o aquellos términos de la ecuación, consiste en introducir "longitudes características" cuya medida relativa indique la posible magnitud de los efectos observables.

Este procedimiento, extensamente utilizado en análisis teóricos, se basa en el siguiente razonamiento: supongamos que expresamos matemáticamente, normalmente en forma diferencial, las leyes que debe cumplir un cierto fenómeno. En tales expresiones aparecerán, en general, derivadas respecto al tiempo t y respecto a la posición x, y, z .

Introduzcamos unas "longitudes características" definidas como la distancia necesaria para que un cierto efecto experimente una variación fijada de antemano. Que la longitud característica correspondiente a un efecto sea mucho mayor que, por ejemplo, la longitud característica del recipiente en el que se está realizando el experimento, indica que el efecto considerado no "tiene sitio" para variar y sus derivadas son despreciables.

Las cuatro longitudes características que consideraremos son: Distancia de Debye; Radio de Lar-

mor; camino libre medio y longitud característica de la geometría particular considerada. La primera indica los efectos eléctricos; la segunda, los magnéticos; la tercera, la frecuencia de las colisiones, y la cuarta, es la longitud de comparación.

2.1.1. *Distancia de Debye.* — Las propiedades eléctricas de un plasma están determinadas por el movimiento de iones y electrones.

Consideremos un ión situado, por ejemplo, en el origen de coordenadas. Se ocurre pensar que, en media, estará rodeado de electrones, ya que la carga eléctrica del ión tiende a atraer los electrones y a repeler los iones.

La fuerza de atracción o repulsión que puede ejercer el ión sobre una cierta partícula, se atenúa (exponencialmente) con la distancia al origen debido al efecto de apantallamiento de la nube de electrones.

La distancia a partir de la cual la atenuación es efectiva, se llama *Distancia de Debye*.

Se comprende que dicha distancia disminuye al aumentar la densidad y, en cambio, aumenta con la temperatura, ya que la agitación térmica es un agente desequilibrador que se opone a la acción de las fuerzas electrostáticas.

Es posible demostrar que la distancia de Debye depende de la relación entre la temperatura y la densidad.

2.1.2. *Radio de Larmor.* — Consideremos un ión o electrón que se mueve con cierta velocidad \vec{v} en un campo magnético \vec{B} , y que no experimenta ninguna colisión con otras partículas, sean éstas electrones, iones o moléculas.

La electrodinámica enseña que la fuerza, y por tanto, la aceleración, a la que está sometido el ión o electrón es proporcional al producto vectorial $\vec{v} \wedge \vec{B}$.

Es fácil comprender que si en cada instante la aceleración de la partícula es perpendicular, tanto al campo como al vector velocidad, la partícula describirá una trayectoria helicoidal cuyo eje coincide con B .

El radio de la hélice es el *Radio de Larmor* que dependerá de la masa de la partícula, de su velocidad (temperatura) y del campo magnético.

Cuanto mayores sean la masa y temperatura y menor el campo magnético, tanto mayor será el radio de Larmor.

2.1.3. *Camino libre medio.* — Es un concepto familiar en Teoría Cinética de Gases. Representa el camino que recorre una partícula, de propiedades medias, entre dos colisiones consecutivas.

Debe observarse que colisión tiene un significado más general que el de choque de dos bolas de billar. En nuestro caso, indica intercambio de energía entre dos o más partículas.

2.1.4. *Longitud geométrica característica.* — Indica la escala del aparato en que se realiza el experimento. Por ejemplo, el diámetro del tubo por el que fluye el gas.

Para fijar ideas indicaremos que en materia de fusión nuclear o de propulsión electromagnética, dicha longitud es del orden del centímetro. En problemas relacionados con la conversión directa de energía, es del orden del decímetro. En problemas geofísicos, es del orden de 10^5 Km.

Un mismo valor de la longitud característica de un cierto efecto, p. ej., el radio de Larmor si se trata de efectos magnéticos, puede ser mucho más grande que la longitud geométrica característica en problemas relacionados con propulsión electromag-

nética; y mucho más pequeña en problemas geofísicos. En el primer caso, el efecto del campo magnético es despreciable, en el segundo es muy importante.

2.2. DOMINIOS DE INTERÉS.

Para centrar claramente el objeto de nuestro estudio, utilizaremos el diagrama propuesto por KANTROWITZ y PETSCHKE (figs. 3 y 4).

En el eje de abscisas representaremos el logaritmo decimal de las temperaturas, que mediremos en electrón-voltios. Para fijar ideas diremos que el 0 de la escala (1 electrón-voltio) equivale a unos 10.000 °K, y la temperatura ordinaria corresponde, aproximadamente a 0.07 e.V. cuyo logaritmo es -1.5 .

En el eje de ordenadas llevamos los logaritmos de las densidades en electrones/cm.³.

La tabla I sitúa en el diagrama $\log_{10} T$, $\log_{10} n$, los valores típicos correspondientes a algunos fenómenos de interés.

Figura 3 (Ref. 3).

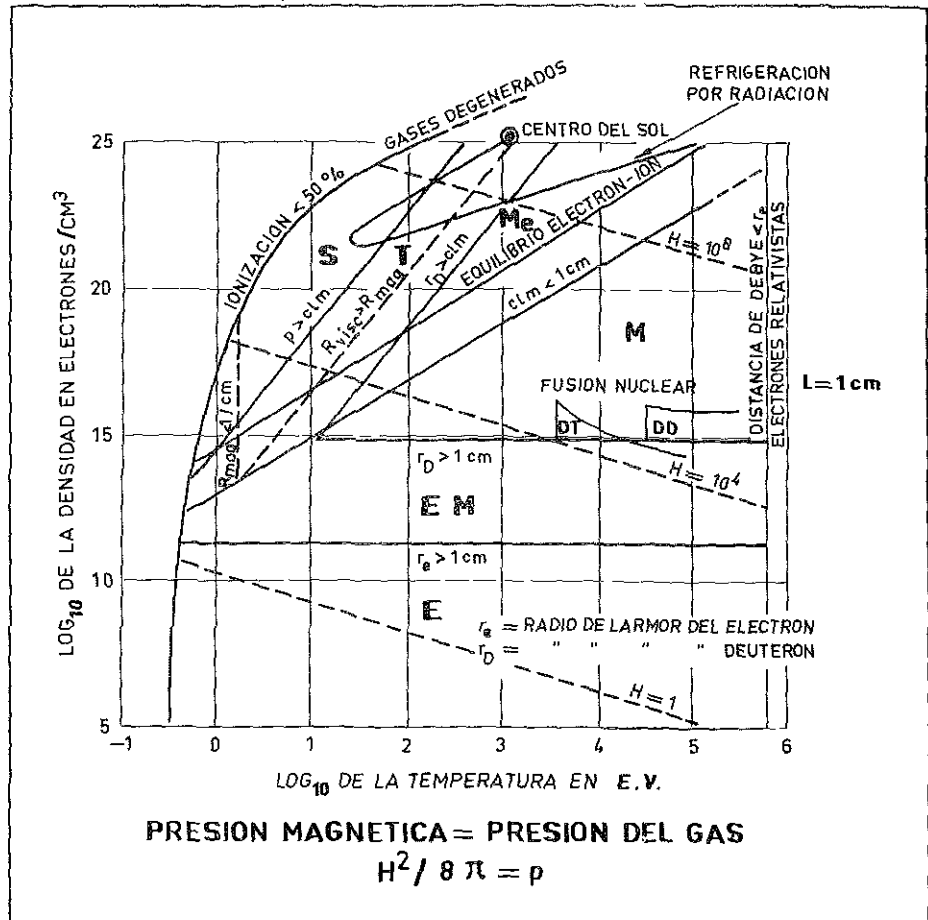


Figura 4. (Ref. 1).

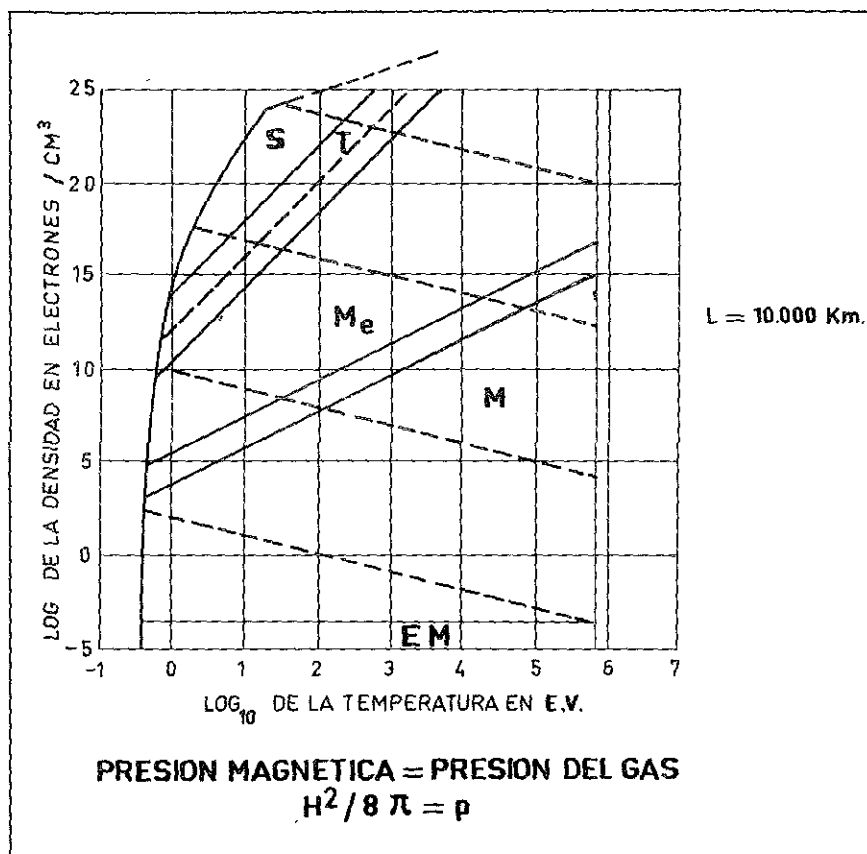


TABLA I. — Valores de las coordenadas del plasma en varios fenómenos.

FENOMENO	Log ₁₀ T	Log ₁₀ n	Referencia
Descarga gaseosa de débil intensidad	4	11	4
Descarga gaseosa de fuerte intensidad	5	15	4
Electrones en metales	2,5	23	4
Capa F de la ionosfera	3,5	6	4
Espacios interestelares	3,5	0	4
Viento solar-magnetoesfera...	5	0,7	5
Interior de las estrellas	7,5	27	4
Interior de las estrellas enanas blancas	7	32	4
Fusión deuterio-tritio	3,5	16	6
Fusión deuterio-deuterio	4,5	16	6
Conversión directa de energía ..	0,3 ?	20 ?	7
Propulsión electromagnética ..	1	20	1

Aunque en rigor el diagrama debiera ser tridimensional, ya que para estudiar las relaciones existentes entre un campo electromagnético y una co-

rriente de gas ionizado es imprescindible fijar el valor del campo magnético, nos limitamos a operar en un plano en el que el campo magnético es tal, que la presión debida a la fuerza ejercida por el campo sobre los tubos fluidos conductores, iguale a la presión del gas debida a las fuerzas de origen puramente mecánico. Dado el carácter cualitativo de esta discusión, es lógico pensar que los resultados obtenidos en este caso particular permanecen prácticamente invariables, salvo si una u otro de las presiones es nula.

Para dibujar el diagrama se ha supuesto que el plasma está en equilibrio, lo que puede no ser generalmente válido en todo el dominio.

La figura 3 (Ref. 3) ha sido dibujada tomando como longitud geométrica característica 1 cm., y la figura 4 (Ref. 1) 10.000 Km. El gas considerado es el deuterio.

2.2.1. Límites del dominio objeto de estudio. Comenzaremos por enmarcar el dominio de interés mediante las limitaciones siguientes:

A) Si la temperatura es muy alta, del orden de 10^6 e.v., la velocidad de las partículas es com-

parable a la de la luz, debiendo tenerse en cuenta los efectos relativistas. La recta de abscisa próxima a 6 es una frontera de nuestro dominio de interés.

B) En el lado contrario del diagrama, correspondiente a temperaturas "pequeñas", la limitación natural está dada por la temperatura necesaria para conseguir un cierto grado de ionización térmica.

La curva dibujada representa, para cada densidad, la temperatura necesaria para producir térmicamente un grado de ionización de 0,5.

El estudio de gases parcialmente ionizados presenta, en el momento presente, un gran número de problemas complicados.

C) Cuando la distancia de Debye es mayor que la dimensión característica del aparato en el que realizamos el experimento, el efecto de pantalla es imperceptible, ya que las reducidas dimensiones del aparato nos impiden alejarnos suficientemente de la partícula considerada. Excluiremos este caso de nuestro dominio, pues parece más lógico estudiar el comportamiento de cada partícula individualmente.

Como la longitud de Debye depende de la relación entre la temperatura y la densidad, el lugar geométrico de los puntos en que dicha longitud es una constante está dado, en el diagrama considerado, por rectas de pendiente unidad.

Tomaremos como límite inferior de nuestro dominio, la recta correspondiente al caso en que la longitud de Debye es igual a la longitud geométrica característica.

E) El pequeño segmento de las figuras, indicado mediante la expresión "Gases degenerados", corresponde a la limitación de que la energía potencial media de las partículas debida a los campos locales variables, no sea mayor que la energía de agitación térmica.

2.2.2. *Fronteras de los diferentes dominios parciales.* — El radio de Larmor nos da una idea de la influencia relativa de los fenómenos magnéticos.

Si es mucho más pequeño que el camino libre medio, la partícula podrá recorrer muchas espiras de la hélice sin sufrir ninguna colisión, y, por tanto, se comportará como si se moviera en un campo magnético con absoluta libertad. Los fenómenos magnéticos son fundamentales.

Por el contrario, si el radio de Larmor es mucho mayor que el camino libre medio, la partícula sólo podrá recorrer un pequeño arco de hélice antes de experimentar una colisión, siendo esta colisión y no el campo magnético la que gobierne el sucesivo comportamiento de la partícula.

Razonamientos análogos permiten demostrar que el comportamiento de una partícula será muy

diferente según que el camino libre medio sea menor o mayor que la dimensión del aparato.

De lo dicho se desprende que serán fronteras de los diferentes dominios parciales las curvas siguientes:

a) Radio de Larmor igual a la dimensión del aparato.

Debe observarse que habrá dos radios de Larmor: uno grande para los iones y otro pequeño para los electrones.

En el caso de las figuras, el radio de Larmor resulta ser independiente de la temperatura, e inversamente dependiente de la densidad.

Trazaremos sobre el diagrama las dos rectas horizontales $r_e = L$ y $r_i = L$. Siendo L la longitud geométrica característica. Por encima de cada recta el radio es más grande que L , y, por debajo, más pequeño.

b) Los radios de Larmor de iones y electrones iguales al camino libre medio.

Por encima de las curvas el camino libre medio es menor que el radio de Larmor correspondiente.

c) El camino libre medio, igual a la dimensión característica del aparato.

Dibujadas estas curvas, pasaremos a estudiar las diferentes regiones del dominio. En cada una de estas regiones, el plasma obedece a una ecuación de Boltzmann distinta.

1.º *Región S (escalar).* — El camino libre medio es menor que el radio de Larmor, tanto para electrones como para iones, las colisiones gobiernan el proceso como ocurriría en el caso de gases no ionizados. Iones y electrones se difunden a través del gas como si se tratara de partículas neutras.

Como, en general, el movimiento de una partícula cargada se debe a dos efectos: el campo eléctrico, que desplaza la partícula en su dirección, y el magnético, que la obliga a describir una hélice; resulta que si este último no ejerce influencia apreciable, la partícula se moverá en la dirección del campo eléctrico. Por tanto, la conductividad, que relaciona campo eléctrico con desplazamiento, es un escalar.

2.º *Región T (tensorial).* — El efecto del campo magnético es apreciable, al menos para los electrones, cuyo desplazamiento no será ya paralelo al campo eléctrico. La conductividad es un tensor.

Por su parte, los iones se comportan como partículas neutras.

Los sistemas de propulsión electromagnética y de gobierno de corrientes de alta energía, en estado más o menos avanzado de desarrollo, operan en las zonas S y T, las más extensamente estudiadas hasta el momento.

3.º *Región M* (magnética). — Es la zona en que los fenómenos magnéticos adquieren fundamental importancia (plasma libre de colisiones). El plasma se encuentra en tal situación en la magnetosfera y en algunos sistemas propuestos de fusión controlada.

Si concentramos nuestra atención en la figura 4, dibujada para una escala de dimensiones astrofísicas, vemos que la zona M ocupa prácticamente todo el dominio de interés.

El comportamiento del plasma en la región M es completamente distinto del correspondiente a un plasma gobernado por las colisiones, ya que el efecto de éstas consiste en uniformizar propiedades. Por el contrario, un plasma en estado M permite la propagación de ondas sin amortiguación apreciable. En este aspecto, recuerda más a la superficie del agua que a un gas. Corrientes de partículas en un plasma M pueden excitar ondas análogas a las que el viento produce sobre la superficie del agua. Dichas ondas recorren caminos larguísimos sin atenuación apreciable. Tal es el caso de los "Whistlers".

Independientemente de estas consideraciones, cabe decir que el caudal de conocimientos que se adquieran, p. ej., mediante el uso de satélites, en el estudio de la región M, puede conducir a la consecución de reactores de fusión controlada.

4.º *Región EM* (electromagnética). — El radio de Larmor de los iones es excesivamente grande y no pueden seguir su trayectoria helicoidal, mientras que los electrones sí. Mientras aquéllos están sometidos únicamente a efectos eléctricos, los segundos son influidos por los magnéticos.

5.º *Región E* (eléctrica). — Iones y electrones están sometidos únicamente a efectos eléctricos.

3. Sistemas de propulsión eléctrica.

Para terminar, pasaremos revista a ciertos campos de interés aeroespacial en los que se despliega una gran actividad. El primero es el de la propulsión eléctrica de naves espaciales.

El número de sistemas propuestos y en fase más o menos adelantada de desarrollo es grande. En la Ref. 1 puede verse una excelente revisión del estado actual de la técnica en lo concerniente a la propulsión eléctrica.

En líneas generales, se pueden considerar tres tipos diferentes de propulsores: electrostáticos, electrotérmicos y electromagnéticos.

En el sistema electrostático, una fuente apropiada produce un chorro de iones, los cuales son acelerados por un campo eléctrico exterior, situado a

lo largo de la tobera de salida. Estas partículas, al ser lanzadas con una cantidad de movimiento elevada, propulsan el vehículo. Antes de abandonar el motor, se neutraliza el chorro iónico añadiendo los electrones extraídos durante el proceso de separación que tiene lugar en la fuente iónica.

El sistema electrotérmico constituye la extrapolación lógica del cohete de combustible químico.

Mediante descargas de alta intensidad, se produce un plasma de elevada energía térmica. Una tobera apropiada convierte la energía térmica en cinética.

Si aceleramos el plasma producido mediante las descargas de alta intensidad, por medio de un campo magnético apropiado situado a lo largo de la tobera de salida, tenemos un propulsor electromagnético o motor de chorro de plasma (fig. 5).

4. Interacción entre el viento solar y la magnetosfera.

Como ejemplo de aplicación de la física del plasma a la geofísica, consideremos el problema de las tempestades magnéticas y las observaciones asociadas con ellas.

El número de teorías que tratan de explicar la razón de ser de las tempestades magnéticas es muy grande. A pesar de sus variados puntos de vista, todas las teorías están de acuerdo en atribuir estos fenómenos a la interacción entre el viento solar y el campo magnético de la Tierra.

En ausencia de viento solar el campo magnético es, muy aproximadamente, un dipolo.

Cuando el viento solar incide sobre el campo magnético terrestre, éste se comprime a barlovento (*) al mismo tiempo que las partículas solares incidentes se deceleran.

A sotavento, el campo magnético se distorsiona formándose una cavidad que se cierra a gran distancia de la tierra (unas 57 veces el radio de la tierra, mientras que a barlovento la distancia correspondiente es de 7 radios). Esta cavidad, en el interior de la cual está contenido el campo magnético terrestre, se llama magnetosfera.

Hasta muy recientemente todas las teorías existentes ignoraban la presencia de un campo magnético interplanetario, puesto de manifiesto por los experimentos del Pioner 1 y 5, Explorer 10 y 12 y Mariner II. Aunque la orientación del campo no es conocida, su intensidad media, que es del orden de 10^{-4} Gauss, sugiere que juega un importante

(*) Si se supone el plasma perfectamente conductor, es posible demostrar que las líneas de fuerza están "congeladas" en el fluido, es decir, son arrastradas por el fluido.

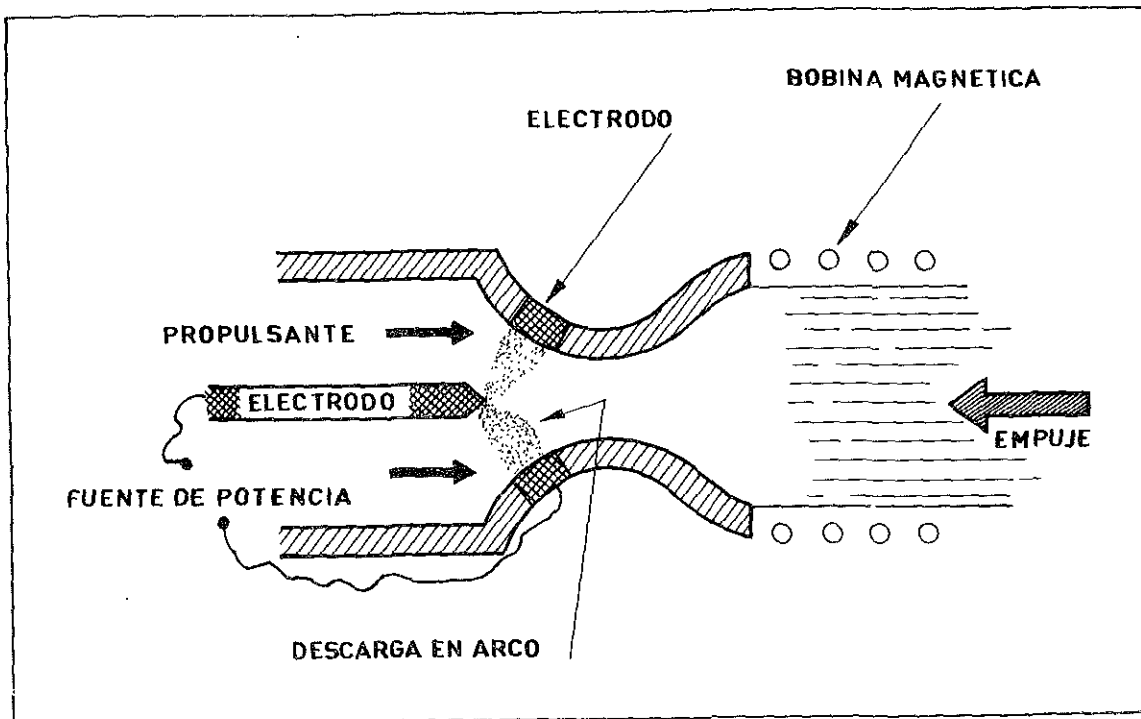


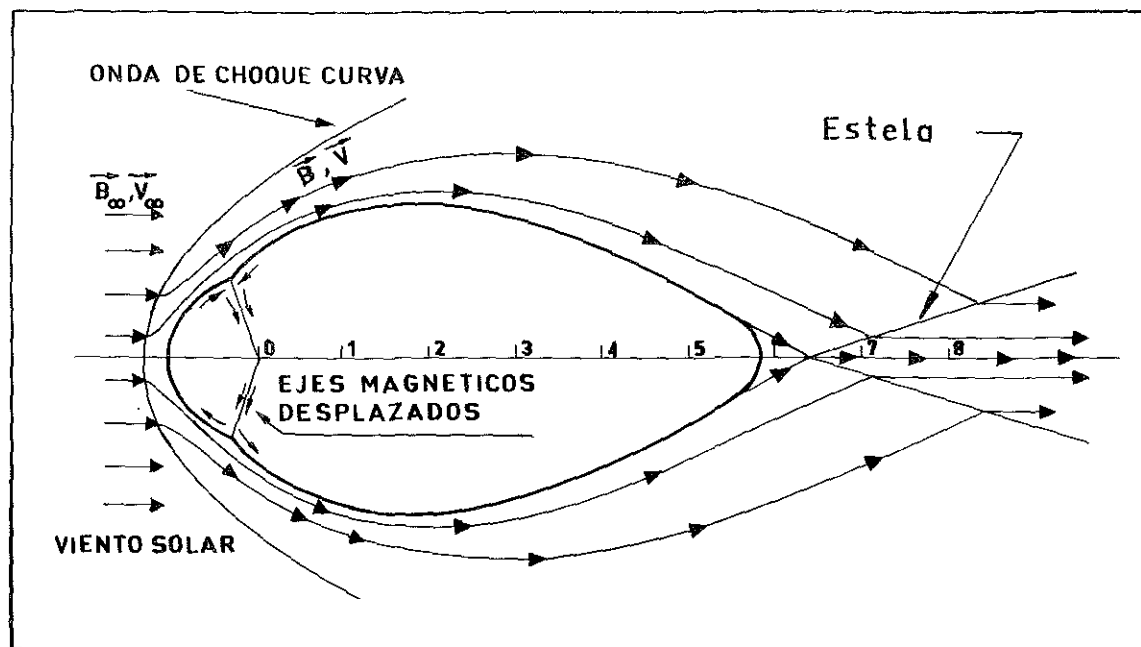
Fig. 5 (Ref. 8).— Motor de chorro de plasma (Plasmajet) de tipo continuo.

papel en el problema considerado. Tampoco es posible decidir por el momento si este campo está relacionado de alguna manera con el geomagnético.

Recientemente LEES (Ref. 9) ha comprobado que, en el caso particular de campo interplanetario radial respecto al Sol, existe una analogía matemá-

tica entre el problema de interacción del viento solar-magnetosfera, y el estudio de la corriente alrededor de un obstáculo de proa redondeada que se mueve en movimiento hipersónico. En los casos en que el campo interplanetario no sea paralelo al viento solar, la semejanza es puramente cualitativa.

Fig. 6. (Ref. 9).—Esquema de la corriente de plasma solar alrededor de la cavidad geomagnética. El plano de la figura contiene los polos geomagnéticos.



La analogía se fundamenta en las siguientes observaciones:

a) El radio de Larmor de los iones, basado en la velocidad del viento solar, que es de 400 Km. por segundo, vale 400 Km. y es, por tanto, mucho menor que la longitud característica de la "proa" de la magnetoesfera, que es varias veces el radio de la Tierra. Por tanto, las partículas siguen las líneas de fuerza del campo interplanetario; se mueven paralelamente a la dirección del viento solar.

b) La velocidad del viento solar es unas seis veces mayor que la velocidad a la que se propagan las ondas magnetofluidomecánicas (velocidad de Alfvén), y quince veces mayor que la velocidad del sonido correspondientes a las condiciones que existen en el medio considerado. Esto quiere decir

que la magnetoesfera perturba el viento solar formando una onda de choque curva. Corriente arriba de esta onda de choque el viento solar no está perturbado.

La configuración resultante es la indicada en la figura 6.

Aunque el problema no está completamente resuelto, pues quedan muchos puntos por aclarar, como: efectos no estacionarios, difusión en la estela, influencia de la componente del campo interplanetario normal al viento solar (si es que realmente existe tal componente), etc., el modelo de LEES representa una base sólida que se irá completando a medida que las sondas interplanetarias suministren información sobre los aspectos más oscuros del fenómeno.

Referencias.

1. KANTROWITZ, A. R.: "Horizons in Plasma Dynamics". 2nd Von Kármán Lecture. *Astronautics & Aeronautics*, vol 3 No 1 pp. 52-64, 1965.
2. THOMPSON, W. B.: "An Introduction to Plasma Physics", Addison-Wesley, 1962.
3. KANTROWITZ, A. R.; PETSCHKE, H. E.: "An Introductory Discussion of Magnetohydrodynamics", en *Magnetohydrodynamics*, Rolí K. M. Landshoff-Stanford University Press, 1957.
4. DELCROIX, J. L.: "Introduction to the Theory of Ionized Gases". *Interscience Tracts on Physics and Astronomy*, núm. 8, 1960. Publicado en francés: *Introduction à la théorie des gaz ionisés*. Monographies Dunod, núm. 12, 1959.
5. BACHYNSKI, M. P.: "Simulation of Geophysical Phenomena in the Laboratory", *AIAA Journal*, vol. 2, número 11, pp. 1873-1882, 1964.
6. POST, R. F.: *Review Modern Physics*, vol. 28, número 383, 1956.
7. GIBRAT, R.: *La Mécanique des Fluides et la Magnétohydrodynamique*. Collection du Laboratoire National d'Hydraulique. Eyrolles, 1962.
8. SCHWARTZ, I. R., STUHLINGER, E.: "The Role of Electric Propulsion in Future Space Programs", *ARS Meeting*, Los Angeles, noviembre 1962.
9. LEES, L.: "Interaction Between the Solar Plasma Wind and the Geomagnetic Cavity", *Aerospace Sciences Meeting*, New York, enero 1964.

LA ESTACION DE EXPLORACION DEL ESPACIO LEJANO, DE ROBLEDO DE CHAVELA, COLABORA EN LA MISION DEL "MARINER IV"

En la noche del 14 al 15 de julio, después de un largo viaje de casi ocho meses de duración, el "Mariner IV" llegó a las proximidades del Planeta Marte, pasando a 9.800 Km. de distancia del mismo a las 2 horas 0 minutos 58 segundos, hora española. Poco antes, entre la 1 hora 21 minutos y la 1 hora 45 minutos, la cámara de televisión de este vehículo había tomado 21 vistas de la superficie del Planeta. Esta información, registrada a bordo en cinta magnética, empezó a ser retransmitida a la Tierra unas horas más tarde, a las 14 horas y 2 minutos del referido día 15 de julio. La Estación Espacial de Robledo de Chavela, sobre cuyo horizonte acababa de aparecer en esos momentos el "Mariner IV", empezó a recibir esta primera fotografía, y la continuó recibiendo durante las 8 horas y 35 minutos que tardó el "Mariner IV" en completarla. En días sucesivos se siguieron recibiendo en esta Estación más fotografías de la serie, hasta que nueve días más tarde terminó el "Mariner IV" de transmitir las 21 fotografías que tenía almacenadas. En los días siguientes el "Mariner IV" volvió a transmitir, por segunda vez, todas las fotografías, como garantía de posibles defectos de la recepción en tierra de las mismas.

La Estación Espacial de Robledo de Chavela continúa manteniendo contacto diario con el "Mariner IV", y así está previsto que siga mientras se conserven las comunicaciones con el citado vehículo.



El Embajador de los Estados Unidos en Madrid, el Presidente de la CONIE, el Director del INTA y el Co-Director español de la Estación celebran el éxito obtenido por la Estación Espacial de Robledo de Chavela con motivo de la recepción de las primeras fotografías de Marte.

Ur1015a

jlcd006a
rr lrid
de jjpl 019
28/0019z
fm e. rechtin
to general
jst016a
rr lrid
de jjpl 019
28/0019z
fm e. rechtin
to general perez marin, director general inta

thank you sincerely for your warm congratulations for mariner iv. we have always liked working with you and your inta personnel. we can all be proud that the first part of the first mars picture that was actually processed was from madrid data. i, too, hope that our close relationship will continue to grow.

28/0021z jul jjpl

Telegrama del Sr. Rechtin del Jet Propulsion Laboratory al Director General del I.N.T.A, con motivo de la cooperación de la estación de Robledo de Chavela en la misión del "Mariner IV"